

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP PHỤ KHÁNG SINH TETRACYCLINE TỪ THAN SINH HỌC BIẾN TÍNH CÓ NGUỒN GỐC TỪ XƠ VỎ QUẢ DỪA NƯỚC

TRƯỜNG QUỐC MINH¹, PHẠM LÊ SON², TÔN THẮT LĂNG²,
PHAN QUANG HUY HOÀNG³, HOÀNG TUẤN DŨNG⁴, NGUYỄN MINH KỲ⁵

¹Trường Đại học Thủ Dầu Một

²Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh

³Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh

⁴Trường Liên ngành và Nghệ thuật, Đại học Quốc Gia Hà Nội

⁵Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh

Tóm tắt

Ô nhiễm dư lượng kháng sinh Tetracycline (TC) trong môi trường nước ngày càng đáng lo ngại, đặt ra nhu cầu cấp thiết về các vật liệu xử lý hiệu quả và thân thiện với môi trường. Nghiên cứu nhằm đánh giá khả năng hấp phụ Tetracycline (TC) của than sinh học XD-KHCO₃ điều chế từ xơ vỏ quả dừa nước. Vật liệu được điều chế bằng cách hoạt hóa xơ dừa với KHCO₃ (tỷ lệ 1:3) và nung ở 700°C; được đặc trưng bằng SEM và FTIR; khả năng hấp phụ được đánh giá qua thí nghiệm theo mẻ với các mô hình đẳng nhiệt và động học. Kết quả cho thấy XD-KHCO₃ có cấu trúc xốp và nhiều nhóm chức bề mặt, đạt dung lượng hấp phụ TC tối đa 291,2 mg/g. Số liệu phù hợp tốt với mô hình Langmuir ($R^2 = 0,994$) và động học Pseudo-second-order ($R^2 = 0,978$), cho thấy hấp phụ đơn lớp do hấp phụ hóa học chi phối. Nhìn chung, việc ứng dụng vật liệu XD-KHCO₃ cho thấy triển vọng đáng kể trong việc loại bỏ TC trong nước.

Từ khóa: Than sinh học, xơ vỏ quả dừa nước, hấp phụ, KHCO₃, Tetracycline (TC).

Ngày nhận bài: 24/5/2026; Ngày sửa chữa: 7/6/2026; Ngày duyệt đăng: 22/6/2026.

Study on the adsorption capacity of Tetracycline antibiotic from modified biochar derived from nipa palm (*Nypa fruticans*) husk fiber

Abstract

Tetracycline (TC) antibiotic residue pollution in water environments is becoming increasingly alarming, creating an urgent need for effective and environmentally friendly treatment materials. This study aims to evaluate the Tetracycline (TC) adsorption capacity of XD-KHCO₃ biochar prepared from nipa palm (*Nypa fruticans*) husk fiber. The material was prepared by activating nipa palm husk fiber with KHCO₃ (1:3 ratio) and calcining at 700°C; it was characterized by SEM and FTIR, and its adsorption performance was assessed through batch experiments using adsorption isotherm and kinetic models. The results showed that XD-KHCO₃ possesses a porous structure and abundant surface functional groups, reaching a maximum TC adsorption capacity of 291.2 mg/g. The data fitted well with the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.994$) and the Pseudo-second-order kinetic model ($R^2 = 0.978$), indicating monolayer adsorption dominated by chemisorption. Overall, the application of XD-KHCO₃ shows considerable promise for removing TC from water.

Keywords: Biochar, nipa palm husk fiber, adsorption, KHCO₃, Tetracycline (TC).

JEL Classifications: O13, Q53, Q55, Q56.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tetracycline (TC) là một loại kháng sinh được sử dụng phổ rộng do hoạt tính phổ quát chống lại vi khuẩn (cả Gram dương và Gram âm), mycoplasma, nấm (chlamydia), rickettsia và ký sinh trùng, và là loại kháng sinh chính được sử dụng trong điều trị cho người, thú y và làm phụ gia thức ăn trong nông nghiệp [1]. TC là loại kháng sinh được sản xuất và tiêu thụ nhiều thứ hai trên toàn thế giới [2] nhờ các đặc tính như giá thành thấp, ít độc hại, hoạt tính phổ rộng và

có thể dùng đường uống [3]. Ngoài lĩnh vực điều trị cho người và thú y, TC còn được ứng dụng rộng rãi như một chất kích thích tăng trưởng trong nuôi trồng thủy sản để tăng khả năng hấp thụ chất dinh dưỡng, từ đó tăng doanh thu thương mại cho người nuôi [4]. TC thường được phát hiện trong nước mặt và nước ngầm do ứng dụng rộng rãi và khả năng hấp phụ cao; trong khi đó, các nhà máy xử lý nước thải không thể loại bỏ các chất ô nhiễm vi lượng này khỏi nước thải sinh hoạt và dẫn đến việc thải chúng ra môi trường, gây ra sự



hiện diện của dư lượng kháng sinh trong hệ sinh thái. Dư lượng kháng sinh này, dù là thuốc dùng ban đầu, sản phẩm chuyển hóa hay đôi khi là phức hợp TC-kim loại trong môi trường nước, có thể gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đến môi trường, đối với con người và động vật dưới dạng vi sinh vật kháng kháng sinh hoặc dẫn đến sự phát triển của một loại bệnh mới [5]. Việc tìm kiếm các kỹ thuật thay thế tức thời để loại bỏ TC khỏi nước thải với hiệu quả về chi phí và tính bền vững môi trường là rất cần thiết.

Nhiều công nghệ hấp phụ [6], lọc màng [7], quá trình oxy hóa nâng cao [8] và phân hủy sinh học [9] đã được phát triển để loại bỏ TC khỏi nước. Trong đó, hấp phụ được xem là một công nghệ đầy hứa hẹn do có nhiều ưu điểm như hiệu quả cao, chi phí thấp và đơn giản. Trong số tất cả các loại chất hấp phụ, than sinh học được đặc trưng bởi diện tích bề mặt riêng lớn, độ xốp phát triển và nguyên liệu thô phổ biến. Do đó, nó được biết đến là chất hấp phụ triển vọng cho việc loại bỏ chất gây ô nhiễm nước [10], [11] và đã thu hút được sự chú ý trong lĩnh vực xử lý nước thải.

Tuy nhiên, than sinh học thuần túy có hạn chế là diện tích lỗ rỗng nhỏ và bề mặt ít nhóm chức, dẫn đến hiệu quả hấp phụ không cao. Để nâng cao hiệu quả hấp phụ thì gần đây, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng cần phải hoạt hóa vật liệu. Quá trình hoạt hóa này nhằm mục đích mở rộng diện tích bề mặt sinh khối và tăng cường phân bố kích thước lỗ xốp, đây là những yếu tố quan trọng trong hiệu quả hấp phụ [12]. Việc sử dụng KHCO_3 , một loại muối kiềm nhẹ, đặc biệt có lợi do tính ăn mòn thấp hơn so với các chất hoạt hóa khác như KOH và NaOH, cho thấy tiềm năng ứng dụng quy mô lớn an toàn hơn với giảm hao mòn thiết bị.

Xơ dừa là phế phẩm nông nghiệp sẵn có, giá thành rẻ. Đây là vật liệu giữ nước tốt, tơ xốp, phù hợp cho thủy canh và trộn đất, giúp bộ rễ phát triển mạnh và thân thiện với môi trường. Đặc điểm xơ dừa có chứa hàm lượng carbon cao, cấu trúc xốp chứa nhiều lignin và cellulose cao thích hợp làm than sinh học.

Vấn đề trọng tâm mà nghiên cứu tập trung giải quyết là phát triển một vật liệu hấp phụ chi phí thấp, thân thiện môi trường và có hiệu quả cao, được chế tạo từ nguồn phụ phẩm nông nghiệp sẵn có, nhằm loại bỏ hiệu quả dư lượng kháng sinh Tetracycline (TC) trong môi trường nước. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu hướng đến bốn nội dung chính: (i) tổng hợp và hoạt hóa than sinh học từ xơ vỏ quả dừa nước bằng KHCO_3 nhằm cải thiện độ xốp và mật độ nhóm chức bề mặt; (ii) xác định đặc trưng cấu trúc và hóa học bề mặt của vật liệu thông qua phân tích SEM và FTIR; (iii) đánh giá khả năng hấp phụ TC qua thí nghiệm theo mẻ và xác định dung lượng hấp phụ cực đại; và (iv) làm rõ

cơ chế hấp phụ thông qua các mô hình đẳng nhiệt (Langmuir, Freundlich) và động học (Pseudo-first-order, Pseudo-second-order). Trên cơ sở đó, nghiên cứu cung cấp luận cứ khoa học cho việc ứng dụng than sinh học biến tính từ xơ dừa như một giải pháp khả thi và bền vững trong xử lý ô nhiễm kháng sinh trong nước thải.

Mặc dù hấp phụ Tetracycline bằng than sinh học hoạt hóa KHCO_3 đã được khảo sát trên nhiều loại sinh khối khác nhau, và than sinh học từ dừa thường (*Cocos nucifera*) cũng đã được nghiên cứu cho một số loại kháng sinh, nhưng đến nay vẫn chưa có công trình nào sử dụng xơ vỏ quả dừa nước (*Nypa fruticans* Wurmb) làm nguyên liệu chế tạo than sinh học để loại bỏ TC trong môi trường nước. Dừa nước là loài cỏ ngập mặn phân bố rộng, khác biệt về mặt phân loại học và thành phần so với dừa thường, đồng thời là nguồn phụ phẩm dồi dào nhưng còn bị bỏ phí, đặc biệt tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Do đó, tính mới của nghiên cứu này thể hiện ở việc lần đầu tiên kết hợp nguyên liệu xơ vỏ quả dừa nước với tác nhân hoạt hóa KHCO_3 , một muối kiềm nhẹ, ít ăn mòn thiết bị và thân thiện hơn so với KOH hay NaOH, nhằm tạo ra vật liệu XD- KHCO_3 có cấu trúc xốp phát triển và giàu nhóm chức bề mặt cho mục tiêu hấp phụ TC. Bên cạnh việc đánh giá hiệu quả và làm rõ cơ chế hấp phụ, nghiên cứu còn hướng đến giá trị thực tiễn theo định hướng kinh tế tuần hoàn, khi hóa giá trị một dòng sinh khối đặc thù của vùng để vừa góp phần xử lý ô nhiễm dư lượng kháng sinh, vừa nâng cao giá trị cho phụ phẩm nông nghiệp địa phương.

Trong nghiên cứu này, điều chế than sinh học từ xơ dừa hoạt hóa Kali bicarbonat (KHCO_3) đã được thực hiện nhằm mục đích đánh giá hiệu quả của than sinh học mang tên XD- KHCO_3 được hình thành từ xơ dừa trong việc loại bỏ Tetracycline (TC) thông qua quá trình tẩm xơ vỏ quả dừa nước với KHCO_3 .

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hóa chất

Các hóa chất được sử dụng, bao gồm là Tetracycline (độ tinh khiết 99,9%), metanol (độ tinh khiết $\geq 99,9\%$ HPLC), acetonitril (độ tinh khiết $\geq 99,9\%$ HPLC) được cung cấp bởi Merck & Co., Inc. (Kenilworth, N.J. USA). pH dung dịch được điều chỉnh bằng NaOH 0,1N và HNO_3 0,1N. Tất cả các dung dịch được chuẩn bị bằng nước siêu tinh khiết deionized (nước DI) (18,2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$). Những hóa chất khác được sử dụng đều được mua từ Showa Chemical Industry Co. Ltd, Japan.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Điều chế than sinh học

Xơ vỏ quả dừa nước (*Nypa fruticans* Wurmb) sử dụng trong nghiên cứu được thu gom từ phần vỏ xơ



bao quanh hạt của quả dừa nước thải bỏ sau khi lấy cùi, tại xã Long Hồ, tỉnh Vĩnh Long, thuộc khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Dừa nước là loài cọ ngập mặn (mangrove palm) phân bố rộng ở vùng cửa sông, bãi triều và ven kênh rạch nước lợ Nam Bộ; phần vỏ xơ của quả thường bị thải bỏ sau khi sử dụng cùi, tạo thành nguồn phụ phẩm sinh khối dồi dào nhưng còn ít được tận dụng. Xơ vỏ quả có dạng sợi, màu nâu, cấu trúc tơ xoắn và bền cơ học, hàm lượng carbon cao nên thích hợp làm tiền chất chế tạo than sinh học. Theo kết quả phân tích thành phần hóa học các bộ phận của cây dừa nước đã công bố, phần vỏ quả chứa khoảng 36% cellulose, 22% hemicellulose và 27% lignin, cùng hàm lượng tro tương đối cao với các nguyên tố vô cơ chủ yếu là Na, K và Cl [13]. Thành phần giàu cellulose và lignin này là cơ sở thuận lợi để hình thành cấu trúc carbon xoắn và các nhóm chức bề mặt cho vật liệu trong quá trình nhiệt phân và hoạt hóa.

Xơ vỏ quả dừa nước được thu gom, được ngâm và rửa nhiều lần bằng nước máy để loại bỏ các tạp chất hòa tan trên bề mặt. Sau đó, rửa bằng nước cất, sấy khô ở nhiệt độ 80°C, xay nhỏ, rây lấy kích thước hạt 150–250 µm, tiếp tục sấy ở 80°C trong 3h.

Quá trình tẩm KHCO_3 được sử dụng để hoạt hóa sinh khối thu được. Trong quy trình này, bột xơ dừa được kết hợp với KHCO_3 theo tỷ lệ khối lượng 1:3 và trộn trong 20 mL nước khử ion ở nhiệt độ phòng trong 2 giờ. Hỗn hợp sau đó được sấy khô trong lò ở 105°C trong 24 giờ.

Mẫu sau đó được nung nóng trong lò ống ở 700°C trong 2 giờ dưới dòng khí N_2 100 mL/min, với tốc độ gia nhiệt 10°C.min/1. Than sinh học thu được được làm sạch bằng bình ngưng hồi lưu với dung dịch HCl 2 M ở 6°C để loại bỏ tạp chất và khuấy đều ở tốc độ 1000 vòng/phút trong 6 giờ bằng máy khuấy từ. Để đảm bảo loại bỏ hoàn toàn axit, chất rắn được rửa nhiều lần bằng nước khử ion. Sản phẩm cuối cùng được sấy khô trong lò sấy đối lưu không khí ở 60°C trong 8 giờ và được đặt tên là XD- KHCO_3 .

2.2.2. Đặc tính của than sinh học

Hình thái bề mặt của các vật liệu được tổng hợp được chụp bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM, Hitachi SU8010, Tokyo, Nhật Bản) với điện áp gia tốc electron là 15 kV. Các nhóm chức của than sinh học được xác định bằng máy quang phổ FTIR (Nicolet iN10, Thermo Scientific, German) với phổ ghi được từ 4000 cm^{-1} đến 500 cm^{-1} .

2.2.3. Thí nghiệm hấp phụ

Các thí nghiệm hấp phụ hàng loạt được tiến hành bằng cách sử dụng 120 mg XD- KHCO_3 trong 150 mL dung dịch gốc chứa 10 nồng độ TC khác nhau (5 - 50 mg/L) trong bình tam giác 250 mL. NaNO_3 (0,01 M)

được sử dụng làm chất điện phân hỗ trợ. Tất cả các mẫu được lắc trong máy lắc ở tốc độ 150 vòng/phút và 25°C trong 12 h để thực hiện các thí nghiệm hấp phụ cân bằng. Đối với các thí nghiệm động học hấp phụ, phần dung dịch được lấy mẫu lần lượt là 5 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 8 h, 12 h. Tại thời điểm hấp phụ cụ thể, tức là 12 h để cân bằng, 1 mL dung dịch được lấy mẫu bằng ống tiêm và lọc qua bộ lọc 0,22-µm để thu dung dịch lọc sau hấp phụ và phân tích nồng độ TC còn lại. TC được xác định bằng cách sử dụng HPLC (Agilent 1200).

Khả năng hấp phụ TC được tính toán theo công thức sau:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{W}$$

Trong đó, q_e (mg/g) là lượng TC được hấp phụ bởi than sinh học, C_0 (mg/L) là nồng độ ban đầu của TC, C_e (mg/L) là nồng độ cân bằng của TC, V (L) là thể tích dung dịch phản ứng, và W (g) là liều lượng của than sinh học.

Động học hấp phụ được đặc trưng bởi các mô hình động học: mô hình Pseudo-first-order, mô hình Pseudo-second-order. Mô hình Pseudo-first-order được mô tả như sau [14]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Mô hình Pseudo-second-order được thể hiện như sau:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 k_2} + \frac{t}{q_e}$$

Trong đó, k_1 (min^{-1}) và k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) là hằng số tốc độ cân bằng Pseudo-first-order và Pseudo-second-order, t là thời gian tiếp xúc (min). q_t và q_e lần lượt là lượng TC bị hấp phụ trên một đơn vị khối lượng của XD- KHCO_3 tại thời điểm t và trạng thái cân bằng (mg/g).

Dữ liệu hấp phụ cân bằng được trang bị bởi các đường đẳng nhiệt hấp phụ: Langmuir và Freundlich. Mô hình Langmuir được mô tả như sau:

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Trong đó: q_e là khả năng hấp phụ cân bằng của TC (mg/g), $q_{\max}$ là khả năng hấp phụ đơn lớp tối đa (mg/g), K_L là hằng số Langmuir (L/mg), và C_e là trạng thái cân bằng nồng độ TC (mg/L).

Mô hình Freundlich được mô tả như sau:

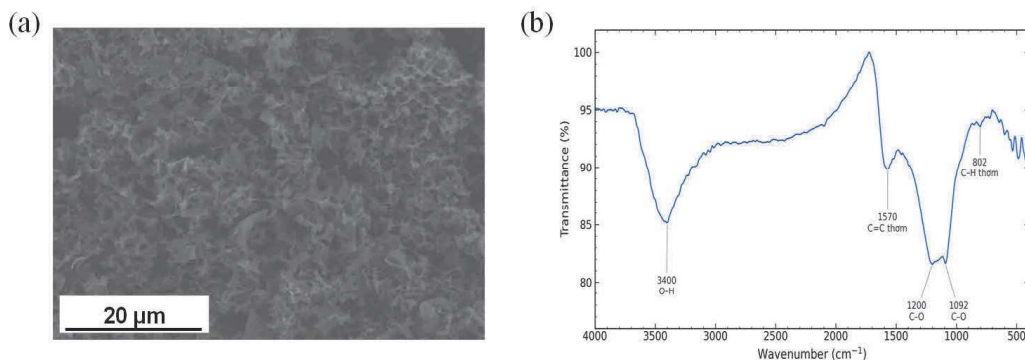
$$q_e = K_F \times C_e^n$$

Trong đó: q_e là khả năng hấp phụ cân bằng của TC (mg/g), n là hệ số không đồng nhất bề mặt, K_F là hằng số Freundlich (mg/g)(L/mg) $^{1/n}$, và C_e là nồng độ TC cân bằng (mg/L).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính của than sinh học

Hình ảnh SEM cho thấy XD- KHCO_3 hấp phụ từ vỏ xơ dừa có cấu trúc bề mặt không đồng nhất với sự hiện



Hình 1. (a) Ảnh SEM và (b) phổ FTIR của XD-KHCO₃

diện của các hạt có kích thước nano và vi mô phân bố ngẫu nhiên. Bề mặt XD-KHCO₃ thể hiện nhiều lỗ xốp trung bình và ít lỗ xốp nhỏ do sự bay hơi của CO₂ và các khí khác được tạo ra trong quá trình nhiệt phân (Hình 1 (a)), góp phần tăng khả năng tiếp xúc với dung dịch chứa Tetracycline.

Phổ FTIR cho thấy dạng hấp phụ đặc trưng của XD-KHCO₃ ở 3400 cm⁻¹ (hợp chất hydroxyl), 1570 cm⁻¹ (nhóm C=C), 1092-1200 cm⁻¹ (nhóm C-O), 802 cm⁻¹ (nhóm C-H) (Hình 1 (b)). Kết quả FTIR chỉ ra rằng các vật liệu được chế tạo có chứa nhiều nhóm chức, có thể tăng cường đáng kể số lượng vị trí hoạt động trên bề mặt và cải thiện hơn nữa khả năng hấp phụ.

Sự kết hợp giữa cấu trúc xốp và thành phần nhóm chức bề mặt là cơ sở giải thích cho khả năng hấp phụ TC vượt trội của XD-KHCO₃. Trong quá trình hoạt hóa bằng KHCO₃, sự phân hủy nhiệt kèm theo giải phóng CO₂ và các khí khác đã hình thành hệ thống lỗ xốp trung bình phát triển, làm tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và mở rộng kênh khuếch tán, giúp phân tử TC dễ dàng tiếp cận các vị trí hấp phụ bên trong vật liệu. Đồng thời, phổ FTIR cho thấy bề mặt vật liệu chứa các

nhóm chức giàu oxy (-OH, C=C, C-O) có thể đóng vai trò là những tâm hoạt động. Phân tử TC chứa vòng thơm cùng các nhóm phenol và carbonyl, nên về mặt lý thuyết có thể tương tác với các nhóm chức bề mặt này thông qua một số cơ chế được giả thuyết như liên kết hydro, tương tác cho-nhận điện tử π-π và tạo phức bề mặt. Tuy nhiên, các cơ chế nêu trên được đề xuất dựa trên đặc điểm nhóm chức và cấu trúc phân tử; việc xác nhận sự tồn tại và mức độ đóng góp của từng cơ chế cần thêm bằng chứng trực tiếp như so sánh phổ FTIR trước và sau hấp phụ, phổ XPS và khảo sát ảnh hưởng của pH dung dịch.

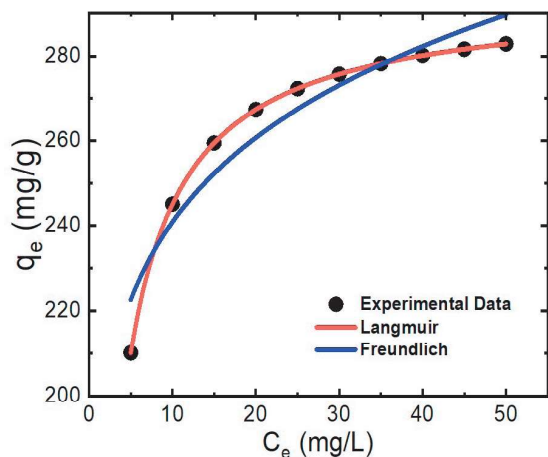
Vai trò của KHCO₃ trong việc phát triển độ xốp và diện tích bề mặt của than sinh học phù hợp với nhận định của Feng và cộng sự [12] khi sử dụng KHCO₃ làm tác nhân hoạt hóa cho than sinh học. Sự hiện diện phong phú của các nhóm chức bề mặt thuận lợi cho quá trình hấp phụ chất ô nhiễm cũng thống nhất với các tổng quan về vật liệu than sinh học [11]. Như vậy, đặc tính bề mặt ưu việt, kết hợp giữa độ xốp cao và mật độ nhóm chức lớn, chính là cơ sở giải thích vì sao XD-KHCO₃ đạt dung lượng hấp phụ (291,2 mg/g) cao hơn

đáng kể so với nhiều loại than sinh học chưa biến tính hoặc biến tính theo phương pháp khác.

3.2. Đường đẳng nhiệt hấp phụ

Để nghiên cứu đặc tính phản ứng của chất hấp phụ và chất bị hấp phụ, đường đẳng nhiệt hấp phụ được sử dụng. Qua quan sát cho thấy dung lượng hấp phụ tăng nhanh trong khoảng nồng độ thấp, sau đó tăng dần cho đến khi đạt khả năng cân bằng hấp phụ cao nhất. Trong nghiên cứu này, các đường đẳng nhiệt hấp phụ TC trên XD-KHCO₃ được phân tích hồi quy bằng cách sử dụng các loại mô hình hấp phụ Langmuir và Freundlich. Đường đẳng nhiệt hấp phụ và hệ số tương quan được trình bày ở Hình 2.

Kết quả đạt được cho thấy số liệu hấp phụ của TC trên XD-KHCO₃ phù hợp tốt với cả hai mô hình



Hình 2. Đường đẳng nhiệt hấp phụ của TC trên XD-KHCO₃.

Bảng 1. Các hệ số đẳng nhiệt hấp phụ thu được từ mô hình Langmuir và Freundlich

Langmuir			Freundlich		
q_m	K_L	R^2	K_F	n	R^2
291,2	0,5	0,994	185,17	8,75	0,920

Bảng 2. So sánh khả năng hấp phụ TC của vật liệu sinh học điều chế từ xơ dừa với một số nghiên cứu trước đây

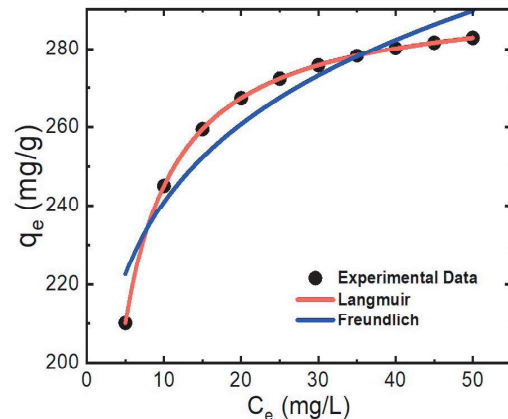
Vật liệu hấp phụ sinh học	Dung lượng hấp phụ tối đa q_{max} (mg/g)	Tài liệu tham khảo
Than sinh học biến tính $KHCO_3$ từ xơ dừa	291,2	Nghiên cứu này
Than sinh học biến tính mangan dioxit	131,49	[15]
Sợi composite graphene oxide/canxi alginat	131,6	[16]
Than sinh học từ lá thông	21,44	[17]
Than sinh học từ trấu	21,37	[17]
Than sinh học từ hạt dẻ	95,06	[18]
Than sinh học từ bã cà phê	11,64	[19]

Bảng 3. Các hệ số động học hấp phụ thu được từ mô hình Pseudo-first-order và Pseudo-second-order

Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
q_e	K_1	R^2	q_e	K_2	R^2
235,16	0,22	0,934	245,75	0,001	0,978

Langmuir ($R^2 = 0,994$) và Freundlich ($R^2 = 0,920$) (Bảng 1). So với mô hình Freundlich, mô hình Langmuir mô tả tốt hơn trạng thái của TC trên XD- $KHCO_3$ với hệ số tương quan cao, chỉ ra rằng hành vi hấp phụ quan sát được chủ yếu là loại đơn lớp. Sau khi kích hoạt $KHCO_3$, khả năng hấp phụ của than sinh học đối với TC được cải thiện đáng kể và khả năng hấp phụ tối đa có thể đạt tới 291,2 mg/g, điều này cho thấy XD- $KHCO_3$ có thể được sử dụng làm chất hấp phụ hữu hiệu để loại bỏ TC khỏi môi trường nước. Từ đó, chứng tỏ rằng sự kết hợp giữa hoạt hóa $KHCO_3$ là phương pháp hiệu quả để nâng cao hiệu suất hấp phụ của than sinh học trong việc loại bỏ kháng sinh.

Bảng 1 cho thấy vật liệu hấp phụ điều chế từ xơ dừa đạt dung lượng hấp phụ TC lên đến 291,2 mg/g, thể hiện hiệu suất vượt trội so với nhiều vật liệu sinh học khác. Cụ thể, các vật liệu khác như than sinh học biến tính mangan dioxit (131,49 mg/g) và sợi composite graphene oxide/canxi alginat (131,6 mg/g) có hiệu suất trung bình. Than sinh học từ hạt dẻ (95,06 mg/g) cho kết quả tương đối tốt nhưng vẫn chưa thật sự nổi bật. Trong khi đó, than sinh học từ lá thông và trấu chỉ đạt khoảng 21 mg/g, và bã cà phê có hiệu suất rất thấp (11,64 mg/g). Xét về mặt kinh tế, tính sẵn có và thân thiện với môi trường, than sinh học biến tính $KHCO_3$ có nguồn gốc từ xơ dừa là một vật liệu đầy hứa hẹn và có tiềm năng trong việc xử lý kháng sinh trong nước thải (Bảng 2).



Hình 3. Động học hấp phụ của TC trên XD- $KHCO_3$

3.3. Động học hấp phụ

Hình 3 thể hiện đường cong động học hấp phụ của TC trên XD- $KHCO_3$. Quá trình hấp phụ nhanh xảy ra ở giai đoạn hấp phụ ban đầu, sau đó là quá trình hấp phụ chậm hơn và đạt đến trạng thái cân bằng sau 4 giờ. Các tham số phù hợp với mô hình động học Pseudo-first-order và Pseudo-second-order được lấy từ phương trình hồi quy tuyến tính (Bảng 3). Kết quả cho thấy các hệ số k_1 và k_2 của hai mô hình khá cao, có thể nói rằng, hai mô hình này mô tả tốt số liệu thực nghiệm. Giá trị R^2 của mô hình Pseudo-second-order cao hơn so với mô hình Pseudo-first-order, cho thấy mô hình Pseudo-second-order phù hợp hơn để mô tả hành vi hấp



Việc nghiên cứu và phát triển các vật liệu hấp phụ chi phí thấp từ phụ phẩm nông nghiệp như xơ vỏ quả dừa nước là một hướng đi đáng được khuyến khích và đầu tư dài hạn theo định hướng kinh tế tuần hoàn

phụ của XD-KHCO_3 . Do mô hình động học Pseudo-second-order bao gồm khuếch tán màng chất lỏng, khuếch tán hạt và hấp phụ bề mặt nên nó thể hiện cơ chế hấp phụ đầy đủ và chính xác hơn so với mô hình Pseudo-first-order. Ngoài ra, mô hình Pseudo-second-order xác nhận rằng quá trình hấp phụ hóa học chi phối động học hấp phụ của TC trên XD-KHCO_3 .

Diễn biến hấp phụ nhanh ở giai đoạn đầu phản ánh mật độ lớn các vị trí hoạt động còn trống cùng chênh lệch nồng độ cao giữa pha lỏng và bề mặt vật liệu; khi các tâm hấp phụ dần bão hòa, tốc độ chậm lại và đạt cân bằng sau khoảng 4 giờ do quá trình khuếch tán nội hạt chi phối. Việc số liệu tuân theo mô hình Pseudo-second-order tốt hơn ($R^2 = 0,978$) gợi ý rằng giai đoạn quyết định tốc độ có thể liên quan đến hấp phụ hóa học, với khả năng chia sẻ hoặc trao đổi điện tử giữa phân tử TC và các nhóm chức bề mặt được nhận diện qua phổ FTIR. Cần lưu ý rằng mức độ phù hợp cao với mô hình bậc hai biểu kiến tự nó chưa đủ để khẳng định bản chất hóa học của quá trình; đặc trưng này chủ yếu phản ánh xu hướng chung được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu hấp phụ TC trên than sinh học biến tính [6], [15], [19]. Các kết quả hiện có nghiêng về giả thuyết rằng tạo phức bề mặt và tương tác hóa học đóng vai trò quan trọng bên cạnh hấp phụ vật lý trong quá trình loại bỏ TC bằng XD-KHCO_3 .

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này là bước đầu trong việc chế tạo và đánh giá vật liệu hấp phụ với việc than sinh học XD-KHCO_3 đã được tổng hợp từ xơ vỏ quả dừa nước (*Nypa fruticans*) hoạt hóa bằng KHCO_3 (tỷ lệ 1:3, nung ở 700°C). Ở quy mô phòng thí nghiệm, vật liệu thu được có cấu trúc xốp và nhiều nhóm chức hoạt động, đạt dung lượng hấp phụ Tetracycline (TC) tối đa 291,2 mg/g trên dung dịch pha bằng nước khử ion và đạt cân bằng sau khoảng 4 giờ. Dữ liệu thực nghiệm phù hợp

với mô hình đẳng nhiệt Langmuir ($R^2 = 0,994$) và động học Pseudo-second-order ($R^2 = 0,978$), gợi ý xu hướng hấp phụ đơn lớp với sự tham gia của hấp phụ hóa học. So với một số vật liệu đã công bố trong cùng điều kiện thí nghiệm, XD-KHCO_3 với dung lượng hấp phụ tương đối cao, đồng thời có ưu điểm về chi phí thấp và tận dụng được phụ phẩm nông nghiệp. Tuy nhiên, đây mới là những kết quả ban đầu trên hệ mô phỏng đơn giản; vật liệu được đánh giá là một ứng viên triển vọng cần được tiếp tục nghiên cứu, cung cấp thêm cơ sở khoa học và thực tiễn để khẳng định khả năng áp dụng trực tiếp vào xử lý nước thải thực tế.

Nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế như các thí nghiệm mới thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm trên dung dịch TC pha bằng nước khử ion, chưa khảo sát trên nước thải thực tế vốn chứa nhiều thành phần nền và ion cạnh tranh. Ảnh hưởng của các yếu tố vận hành như pH, nhiệt độ, lực ion và chất hữu cơ nền chưa được đánh giá đầy đủ. Ngoài ra, khả năng tái sinh, độ bền qua nhiều chu kỳ, cơ chế hấp phụ chi tiết (BET, XRD, XPS) và hiệu quả kinh tế ở quy mô lớn vẫn chưa được phân tích sâu.

Các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng thử nghiệm trên nước thải thực tế từ bệnh viện, chăn nuôi và thủy sản, đồng thời đánh giá khả năng hấp phụ đồng thời nhiều loại kháng sinh. Cần khảo sát hệ thống các yếu tố ảnh hưởng (pH, nhiệt độ, lực ion) và làm rõ cơ chế hấp phụ. Hướng nghiên cứu về khả năng tái sinh, kéo dài tuổi thọ vật liệu, cố định trong cột hoặc kết hợp màng lọc để vận hành liên tục và triển khai quy mô pilot cũng rất cần thiết. Ngoài ra, việc kết hợp với các công nghệ khác (quang xúc tác, phân hủy sinh học) và đánh giá chi phí, lợi ích sẽ hoàn thiện cơ sở cho ứng dụng thực tiễn.

Từ kết quả bước đầu nêu trên, nhóm nghiên cứu đưa ra một số khuyến nghị mang tính định hướng.

